

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Reconstrução Tridimensional de meios porosos utilizando técnicas de *Simulated Annealing*

AUTORES:

Alysson Nunes Diógenes, Luís Orlando Emerich dos Santos, Celso Peres Fernandes

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Santa Catarina

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

Reconstrução Tridimensional de meios porosos utilizando técnicas de *Simulated Annealing*

Abstract

The reservoir rocks physical properties are usually obtained in laboratory, through standard experiments. These experiments are often very expensive and time-consuming. Hence, the digital image analysis techniques are a very fast and low cost methodology for physical properties prediction, knowing only geometrical parameters measured from the rock microstructure thin sections. This research analyzes two methods for porous media reconstruction using the relaxation method simulated annealing. Using geometrical parameters measured from rock thin sections, it is possible to construct a three-dimensional (3D) model of the microstructure. We assume statistical homogeneity and isotropy and the 3D model maintains porosity spatial correlation, chord size distribution and d3-4 distance transform distribution for a pixel-based reconstruction and spatial correlation for an object-based reconstruction. The 2D and 3D preliminary results are compared with microstructures reconstructed by truncated Gaussian methods. As this research is in its beginning, only the 2D results will be presented.

1. Introdução

A caracterização de materiais porosos se constitui em um problema de grande interesse científico e tecnológico. A determinação de propriedades macroscópicas de transporte destes materiais tem aplicação em várias áreas, como a de solos, a de exploração de petróleo e as de construção civil e de construção mecânica, por exemplo.

Os desenvolvimentos do presente trabalho são aplicados para a caracterização de rochas reservatório de petróleo. A geometria das microestruturas porosas, incluindo as rochas reservatório, pode apresentar um alto grau de complexidade, por isso, são várias as propriedades, geométricas ou físicas, que caracterizam estes materiais. Entre estas propriedades, pode-se citar: a porosidade, a distribuição de tamanho de poros, a permeabilidade intrínseca, as curvas de permeabilidade relativa e os parâmetros elétricos (fator de formação e índice de resistividade). Estas propriedades são, usualmente, obtidas em laboratório de petrofísica através de experimentos padrões, em geral de alto custo, destrutivos e demorados, em amostras de testemunhos retirados do reservatório.

Por outro lado, o avanço de técnicas de análise de imagens digitais, aplicadas em seções planas de rochas, vem se mostrando uma metodologia rápida e de baixo custo para a determinação computacional destas propriedades, a partir unicamente do conhecimento da microestrutura da rocha. A partir de parâmetros geométricos e topológicos a medidos em imagens adquiridas através de um microscópio óptico em seções planas polidas, torna-se possível gerar um modelo tridimensional (3D) desta microestrutura

Assumindo-se homogeneidade e isotropia estatísticas, modelos 3D serão gerados a partir de imagens bidimensionais (2D), conservando várias informações, como porosidade, correlação espacial e distribuição de corda linear das fases poro e/ou sólido.

O método baseado no truncamento de campos Gaussianos é atualmente o mais utilizado para a reconstrução 3D de microestruturas porosas. Contudo, este método apresenta problemas no tocante à conservação da conectividade em longa distância para meios com forte organização espacial, por exemplo, rochas com baixa porosidade e alta permeabilidade intrínseca. De fato, este método conserva apenas estatísticas de até segunda ordem (porosidade e correlação a dois pontos) o que é insuficiente para o caso de estruturas com forte organização espacial.

O presente trabalho apresenta dois métodos para a reconstrução de meios porosos em 3D utilizando o método de otimização *Simulated annealing*. A partir de parâmetros geométricos e físicos a serem otimizados obtidos de imagens adquiridas através de um microscópio óptico em seções planas polidas, torna-se possível gerar um modelo 3D desta microestrutura.

Uma análise é feita, comparando-se os resultados de propriedades simulados nos meios reconstruídos com os obtidos em laboratório e parâmetros geométricos dos meios com outras microestruturas obtidas através de seções planas de rochas reservatório.

2. Métodos

Este tópico é dividido em Caracterização da microestrutura e métodos de reconstrução.

2.1. Caracterização da Microestrutura

Uma forma de se caracterizar a microestrutura das rochas reservatório, em especial os arenitos, é extrair informações bidimensionais (2D) desta microestrutura. Os testemunhos são serrados e um cilindro de 10cm de comprimento por 5cm de diâmetro é extraído. Este cilindro, chamado plugue, é limpo com um detergente, impregnado com resina e novamente serrado para se extrair uma lâmina que é polida até a espessura padrão de 30 μ m. Então se observa esta lâmina em um microscópio e se adquire imagens coloridas. Uma imagem típica resultante desta metodologia pode ser vista na Figura 01.

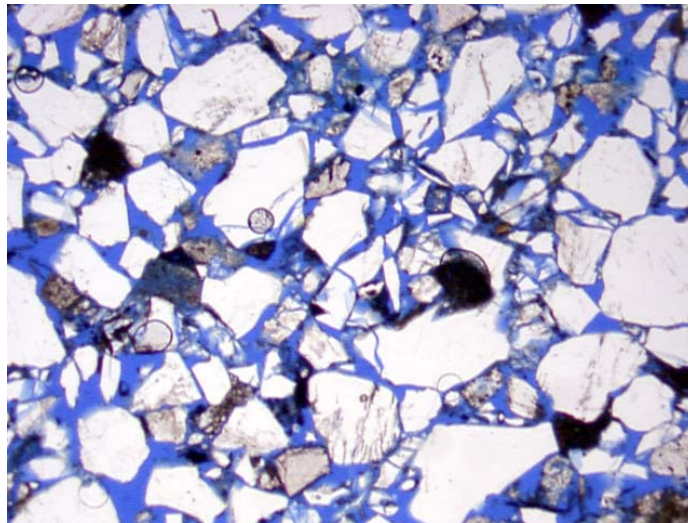


Figura 01 – Imagem da microestrutura de um arenito.

Uma vez obtida a imagem, esta é segmentada para obter-se o espaço poroso, que está impregnado em azul. Utilizou-se o limiar HSI (Gonzales & Woods, 1992). Um exemplo de imagem binarizada pode ser visto na Figura 02 com o espaço poroso em branco.

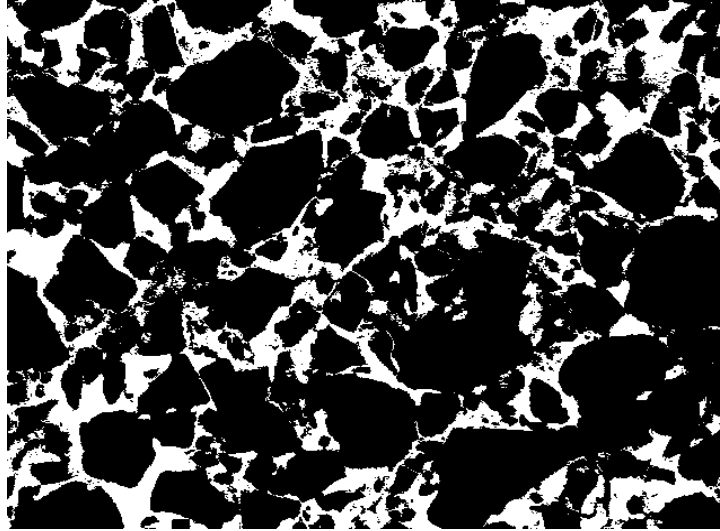


Figura 02 – Imagem binária com espaço poroso em branco.

Uma vez que a imagem foi binarizada, pôde-se medir os parâmetros desejados: função correlação, distribuição de tamanho de cordas (Adler, 1992) e distribuição de imagem de distância ao fundo (IDF). Estes parâmetros foram utilizados pelos métodos de reconstrução para recriar o espaço poroso em 3D.

2.2. Métodos de Reconstrução de Microestrutura

Simulated Annealing. O método de *simulated annealing* foi apresentado primeiramente por Cerny (1985) e Kirkpatrick *et. al.* (1983) para resolver problemas de otimização.

Para utilizar um método de *simulated annealing*, deve-se definir um conjunto de soluções, geralmente grande, representando as soluções de um problema de otimização. Então se define uma estrutura de vizinhança. Para achar uma solução ótima, se move o estado de uma solução não ótima para um de seus vizinhos de acordo com o critério probabilístico de Metropolis exposto na Equação 01.

$$p = \begin{cases} 1 & \text{se } E_t \leq E_{t-1} \\ e^{(E_{t-1} - E_t)/T} & \text{se } E_t > E_{t-1} \end{cases} \quad (01)$$

Se a função custo, chamada energia, decresce, a solução muda e a mudança é aceita. Caso contrário, o movimento é aceito com uma probabilidade que depende de um parâmetro de controle chamado temperatura. Classicamente, a probabilidade de aceitar movimentos ruins (movimentos de maior energia), é alta no princípio do processamento e permite ao algoritmo escapar de mínimos locais. A probabilidade decresce de forma progressiva ao se reduzir a temperatura.

O método de redução de temperatura é comumente chamado de agenda de resfriamento, e algumas das agendas mais utilizadas são a geométrica e a adaptativa (Ben-Ameur, 2004). Este trabalho utilizou a agenda geométrica exposta na Equação 02.

$$T_{i+1} = 0,99 \cdot T_i \quad (02)$$

Neste trabalho apresenta-se dois métodos de reconstrução utilizando técnicas de *simulated annealing*. As diferenças entre o *pixel-based simulated annealing* (PSA) e o *object-based simulated annealing* (OSA) estão na definição da sua vizinhança e como o estado inicial é gerado. O PSA muda a coordenada de *pixels* brancos e pretos e mede o efeito dessa mudança nos parâmetros a serem

otimizados. O OSA muda a localização espacial de um conjunto de *pixels*, nesta pesquisa, uma esfera. Sobre o estado inicial, o PSA inicia o processamento com uma imagem completamente aleatória, enquanto que o OSA inicia com uma imagem preenchida com esferas geradas a partir de uma distribuição de tamanho de grãos medida nas imagens de seções planas.

Ambos os métodos otimizam a função correlação, mas o método PSA otimiza, adicionalmente, a função distribuição de tamanho de cordas e a distribuição de IDF. Pode-se saber mais destes métodos em Adler (1992) e Chassery & Montanvert (1991).

Gaussiana Truncada (GT). Este método tem sido amplamente utilizado (Adler, 1992) e reconstrói uma estrutura 3D conservando a função correlação. Este método tem apresentado os melhores resultados ao se reconstruir arenitos de porosidades em torno de 30% (Liang *et. al.* 1998). Neste trabalho, também avaliou-se o método GT com resolução reduzida. Esta redução foi utilizada para aumentar a conectividade do método, que é perdida quando a função correlação não representa adequadamente a microestrutura das rochas (pode acontecer para rochas de baixa porosidade e alta permeabilidade).

Esferas Sobrepostas (ES). Este método foi proposto por dos Santos *et al* (2002) e utilize a distribuição de tamanho de grãos para reconstruir uma imagem 3D. O método calcula um número de esferas a ser colocada no meio poroso para cada diâmetro com o objetivo de conservar a porosidade. Cada esfera se sobrepõe com esferas vizinhas de acordo com um parâmetro especificado. A sobreposição é compensada ao se adicionar esferas de diâmetros menores.

3. Resultados 2D

Os resultados 2D foram obtidos ao se comparar erros quadráticos da função correlação medidos nas imagens de seções planas e em seções das imagens 3D das reconstruções. A Figura 03 mostra uma imagem binária da amostra chamada 01 na Tabela 01. As Figuras. 04 e 05 mostram as imagens reconstruídas usando os métodos PSA, OSA e GT, respectivamente.

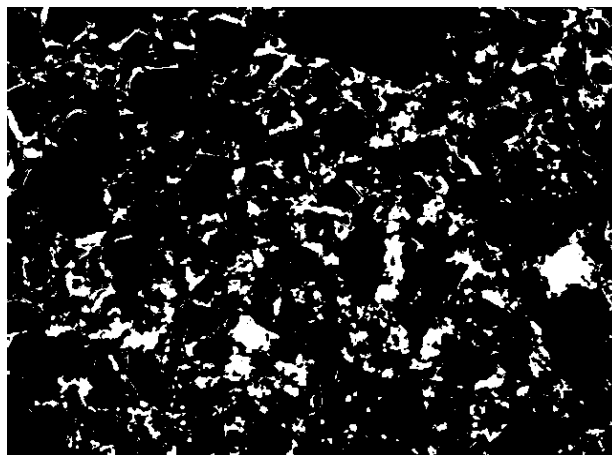


Figura 03 – Imagem original binarizada da Amostra 01 com resolução de 7,8µm.

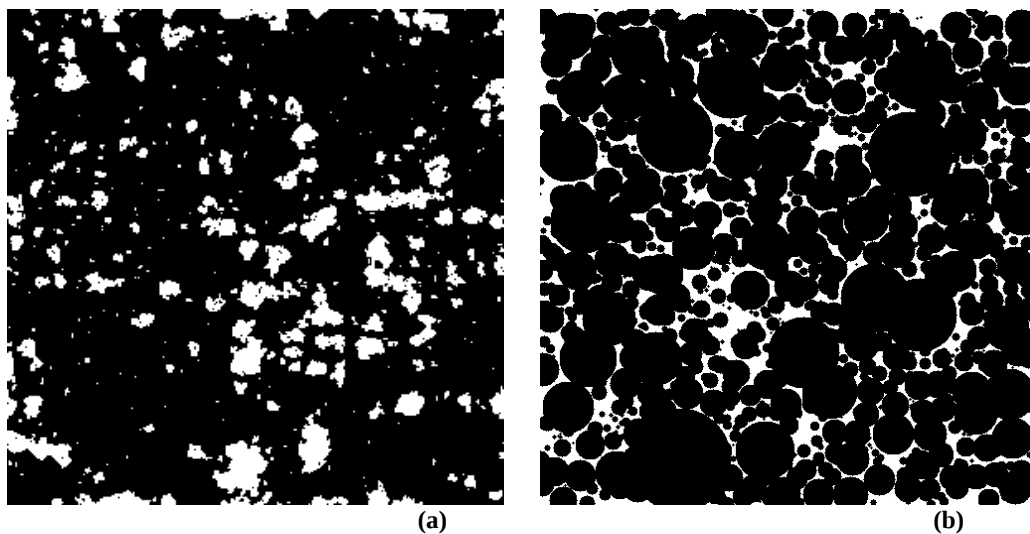


Figura 04 – Imagens de arenito reconstruídas usando os métodos PSA(a) e OSA (b) com resolução de 7,8 μ m.

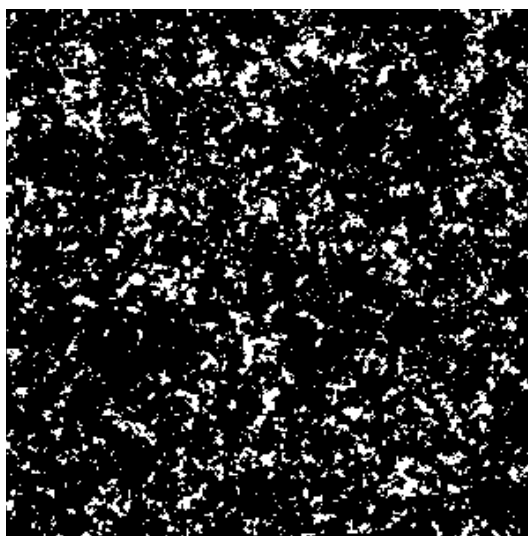


Figura 05 – Imagem de arenito reconstruída usando o método GT com resolução reduzida (31,2 μ m).

O tempo de processamento para uma imagem de 400x400 *pixels*, como as apresentadas anteriormente é apresentado na Tabela 01. Nota-se que os métodos que utilizam técnicas de SA são mais onerosos computacionalmente do que o GT ou o ES.

Método	PSA	OSA	GT	ES
Tempo de processamento (s)	3600	1200	0,01	2

Analizou-se, também, o erro quadrático em relação à função correlação para 8 amostras. Os dados são apresentados na Tabela 1, com os menores erros apresentados nas células em cinza claro. As células em cinza escuro mostram o método que otimizou melhor que os métodos de SA. A última coluna apresenta o método que melhor minimizou a função correlação.

Tabela 1 – Comparação do erro quadrático em relação à função correlação medidas em seções planas e nos métodos de reconstrução pesquisados neste trabalho.

Erro quadrático em relação à função correlação									
Amostra	Porosidade	PSA	OSA	GT-F1	GT-F2	GT-F3	GT-F4	ES	Mínimo
01	13,24%	1,85E-03	4,75E-03	1,22E-02	1,80E-03	1,56E-04	6,19E-05	1,31E-02	GT-F4
02	13,80%	7,74E-04	6,08E-06	9,85E-03	6,87E-04	4,10E-05	3,78E-04	4,42E-01	OSA
03	15,66%	1,89E-03	6,56E-05	3,25E-01	1,46E-02	1,62E-03	1,16E-04	3,61E-03	OSA
04	18,84%	5,98E-04	1,84E-05	2,53E-02	2,62E-03	2,60E-05	1,74E-04	5,98E-02	OSA
05	19,50%	1,53E-02	2,12E-05	7,67E-02	2,01E-02	6,22E-03	1,67E-03	4,78E-01	OSA
06	20,84%	1,28E-03	7,85E-05	4,31E-02	9,11E-03	2,15E-03	4,11E-04	2,48E-01	OSA
07	23,93%	2,93E-03	2,45E-05	3,98E-03	3,57E-04	1,38E-03	2,17E-03	8,79E-03	OSA
08	26,81%	2,99E-02	2,82E-05	9,51E-02	1,97E-02	4,27E-04	7,70E-04	2,57E-02	OSA

4. Discussão

Como apresentado na Tabela 1, o método OSA foi o que melhor reproduziu a função correlação para 7 amostras.

O método PSA foi mais lento, mas obteve melhores reconstruções do que o GT na maioria dos casos, mas quando a resolução do GT é reduzida, a microestrutura é melhor representada pelo segundo método. Este ponto é desencorajador, mas observa-se que o método PSA conserva outros parâmetros além da função correlação. Estes parâmetros foram adicionados com o objetivo de preservar a forma dos poros.

Os resultados do método OSA foram encorajadores. Mesmo se visualmente a imagem não é similar à original, a função correlação foi otimizada de forma adequada, tendo o melhor erro quadrático para 7 das 8 amostras. O método ainda é bastante oneroso computacionalmente, mas caso a conectividade seja preservada em 3D para as amostras de baixa porosidade, o método apresentará ganhos em relação aos demais.

O método GT não apresentou bons resultados na maioria dos casos. Este requer uma redução da resolução para representar o erro quadrático, e mesmo assim, não obteve resultados melhores do que os métodos OSA e ES.

O método ES não representou melhor a correlação do que o método GT, porém esse método tem a vantagem de ser mais rápido do que o OSA e o PSA.

5. Conclusão

O método PSA foi mais lento e menos efetivo que o método OSA.

O método OSA reconstruiu as microestruturas com erro quadrático mais baixo do que os demais métodos para 7 das 8 amostras analisadas. Um fator determinante para esse desempenho foi a movimentação de esferas. Em vez de movimentar *pixels* isolados, o método movimenta objetos, e isso influencia positivamente a conectividade. Mesmo sem otimizar a distribuição de IDF, espera-se que

estes parâmetros devam ser preservados. Esta análise será feita futuramente.

O tempo computacional ainda é proibitivo, mesmo se comparado com o método ES, que é mais lento que o GT.

O próximo passo nesta pesquisa é a comparação do parâmetro distribuição de tamanho de poros e a comparação das reconstruções 3D com imagens microtomográficas de raios-X.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional do Petróleo – ANP pelo financiamento da pesquisa e ao Centro de Pesquisa Leopoldo Américo M. de Mello (CENPES) da Petrobrás pelas imagens utilizadas neste trabalho.

7. Bibliografia

ADLER, P. M. (1992), “Porous Media: Geometry and Transports”, Butterworth, Heinemann.

BEN-AMEUR, W. (2004) “Computing the Initial Temperature of Simulated Annealing” Computational Optimization and Applications, 29, 369–385,

CERNY, V. (1985) “A thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulated algorithm,” Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 45, pp. 41–51.

CHASSERY, J.M., MONTANVERT, A. (1991) “Géométrie discrete en analyse d’images”, Editions Hermès

DOS SANTOS, L.O.E., PHILIPPI, P.C., FERNANDES, C.P., GASPARI, H.C., (2002) “Reconstrução tridimensional de microestruturas porosas com o método das esferas sobrepostas”, Proceedings of the ENCIT 2002, Caxambu - MG, Brazil - Paper CIT02-0449

GONZALES, R., WOODS, R. (1992) “Digital Image Processing”, Prentice Hall.

KIRKPATRICK, S., GELATT, C.D. and VECCHI, M.P. (1983) “Optimization by simulated annealing,” Science, vol. 220, pp. 671–680.

LIANG, Z.R., FERNANDES, C.P., MAGNANI, F.S., PHILIPPI, P.C. (1998). A reconstruction technique for three-dimensional porous media using image analysis and Fourier Transform. Journal of Petroleum Science, 21, 273-283.